

Keywords: *aerial photography, UAV, camera, camera calibration, digital data, laboratory calibration, field calibration, digital model, the test object, software, Surfer, Delta Digitals, Statistica 10.*

Надійшла до редакції

03.03.2018

УДК 517.7

Б.Р. Сосса

*Начальник відділу геоінформаційних
технологій та сканування АТ НВК “Курс”*

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ТИПУ І РОЗМІРУ ПЛОЩИННИХ МАРОК, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ НАЗЕМНИХ ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ

Сучасні дослідження методів калібрування НЛС проводяться в приміщеннях й обмежені за відстанню. В статті розглянуто застосування плоских і циліндричних площинних і сферичних марок або тестових калібрувальних об'єктів під час калібрування наземних лазерних сканерів на всіх діапазонах вимірюваних відстаней. Досліджено мінімально допустимі розміри марок для однозначного визначення поверхонь на відстані до 350м. Доведено, що в процесі калібрування на великій відстані недоцільно використовувати циліндричні марки та сферичні марки стандартних розмірів, натомість доцільно використовувати плоскі площинні марки і сферичні марки збільшеного розміру.

Ключові слова: *наземне лазерне сканування, калібрування сканерів, сферичні марки, циліндричні марки, плоскі площинні марки, тестові об'єкти калібрування.*

Вступ. Використання технологій наземного лазерного сканування (НЛС) для вирішення прикладних завдань останніми роками значно розширилось, а подекуди сканери навіть замінюють традиційні прилади. Це можна пояснити тим, що за точністю деякі сучасні системи досягають показників традиційних геодезичних приладів.

З апаратного погляду особливість НЛС в тому, що нам відомі лише загальні принципи будови сканерів, тоді як для правильного математичного опису об'єкта потрібно знати ще й геометричні та просторові зв'язки між конструктивними елементами сканера. Це спонукає дослідників під час аналізу похибок систем НЛС розглядати їх (системи) з позицій «чорної скриньки», про що йдеться в праці [4]. Зважаючи на це, підвищення точності НЛС нині залишається досить актуальним завданням. Крім того, згадані особливості НЛС залишають широке поле для досліджень.

Аналізуючи дані провідних виробників апаратної частини технології НЛС (Leica Geosystems, Sokkia Topcon, Zoller-Fröhlich, Surphaser, Faro, Riegl, Callidus),

зауважуємо, як постійно підвищується точність обладнання. Однак деякі види інженерно-геодезичних робіт поки що можна виконувати лише традиційними методами. Підвищення точності НЛС передусім дасть змогу вирішувати задачі інженерної геодезії, пов'язані з високоточними вимірюваннями, наприклад, проводити високоточне виконавче знімання, моніторинг об'єктів підвищеної категорії складності тощо. Крім того, отримувана надлишкова інформація може бути використана для розв'язання суміжних завдань, наприклад, для визначення прогинів і деформацій конструктивних елементів, контролю різних площин тощо.

Подальше підвищення точності приладів утруднене через конструктивні особливості механізмів, використовуваних у сучасних системах, наявність тертя в деталях, що обертаються, температурних деформацій та ін. Невід'ємним завданням з підвищення точності є калібрування систем НЛС, яке через вказані особливості систем є складною задачею, що на сьогоднішній день не має однозначного розв'язання.

Калібрування можна визначити як «процес визначення параметрів, за допомогою яких мають бути виправлені виміряні величини для отримання їхніх дійсних значень» [17]. Найчастіше калібрування пов'язане з визначенням інструментальних похибок, а саме розбіжностей між реальним й ідеальним інструментом, які виникають через недосконалість механічних й електронних компонентів. Калібрування НЛС може бути виконане одним з наведених далі методів.

1. *Апаратне калібрування* виконують для окремих частин інструмента, таких як віддалемірні і кутомірні системи. Цей тип калібрування потребує досконалого розуміння моделі похибок сканера. Проте таке розуміння обмежене виробником обладнання патентуванням окремих компонентів і систем. Крім того, апаратне калібрування потребує доступу до спеціальних можливостей, на кшталт високоточних базових ліній, компараторів, високоточних кутових мір, що є практично неможливим для пересічного користувача [18]. При цьому важливо пам'ятати, що побудована таким чином математична модель похибок має фізичний зміст, тобто описує конкретний фізичний процес. Деякі вчені надалі досліджують окремо інструментальні похибки НЛС [4; 17; 18]. Імовірно, що в подальшому це сприятиме підвищенню точності.

2. *Системне калібрування*. У цьому випадку використовують підхід, відомий з фотограмметрії, в якій системне калібрування визначають як «визначення параметрів внутрішнього орієнтування та всіх систематичних похибок для всіх камер (зображень)» [10; 11]. Системне калібрування може бути виконане шляхом самокалібрування, яке у фотограмметрії трактується як «визначення всіх систематичних похибок (плюс, можливо, параметри внутрішнього орієнтування) одночасно з усіма іншими параметрами системи (сумісне вирівнювання), використовуючи концепцію додаткового оцінювання параметрів». Зважаючи на системну подібність фотограмметричного процесу і НЛС, можна сформулювати остаточне визначення терміна: *самокалібрування — це визначення всіх систематичних похибок НЛС одночасно з усіма іншими параметрами системи*. У системному калібруванні, на відміну від апаратного, розуміння моделі похибок сканера не є надто важливим. За такого підходу

застосовують поліноміальні моделі різного типу [13-15], які найкраще описують залежність між виміряними величинами та їх похибками. Отже, оцінювання інструментальних похибок виконується без врахування причин або характеру їх походження [17]. Такий підхід якнайкраще відповідає підходу до моделі сканера, як до «чорної скриньки». Метод самокалібрування, розроблений для фотограмметрії на початку 1970-х років, більшість дослідників вважає оптимальним методом калібрування наземних лазерних сканерів.

Аналіз досліджень і публікацій. Як і в класичних геодезичних приладах, калібрування (юстування) — надзвичайно важливий процес і передумова отримання максимально точної і надійної інформації про тривимірне положення як всієї хмари точок, так і похідних від неї геометричних характеристик об'єкта [3].

Попри величезну кількість досліджень з теорії та методів калібрування систем НЛС, як зазначено в праці [4], сама наявність такої кількості підходів свідчить про те, що до вироблення оптимального методу ще дуже далеко. Математичній моделі калібрування приділено багато уваги в зарубіжних дослідженнях. Можна сказати, що нині ця модель охоплює майже весь спектр можливих додаткових параметрів калібрування. Ті параметри, що лишаються поза цією моделлю, називають емпіричними, їх отримують, досліджуючи конкретну модель НЛС. У 2010 р. були спроби використати для опису математичної моделі похибок тривимірну статистику і теорію графів [9], проте ця модель не змогла скласти конкуренції загальноприйнятій. Структура математичної моделі калібрування НЛС дотепер не визначена.

Особливістю публікацій останніх років є дискусія щодо вибору даних для калібрування. Використання хмари точок породило суперечку про те, які об'єкти слід брати для калібрування: точкові [8], площинні [5], циліндричні [7] чи сферичні [17]. Дослідження згаданих джерел та проведених на їх основі практичних заходів, свідчать що, використовуючи різні типи калібрувальних марок, отримують результати з однаковою точністю. Більший вплив на точність калібрування мають технічні характеристики досліджуваного наземного лазерного сканера.

Постановка завдання. Калібрування НЛС за допомогою марок різного типу у згаданих джерелах проводилося в межах одного приміщення. Таким чином, максимальна відстань до марок становила, в кращому разі, декілька десятків метрів. Проте сучасні сканери працюють в діапазоні до кількох сотень метрів. Крім того, в дослідженнях, що стосуються створення калібрувальних полігонів [1; 3] описано моделі полігонів з довжиною ліній в декілька сотень метрів. Такі полігони можуть бути використані для калібрування більшості моделей сучасних НЛС. Таким чином, склалася ситуація, коли практичні дослідження методів калібрування не відповідають (насамперед, по максимальних відстанях) наявним математичним моделям калібрувальних полігонів. У пропонованій статті досліджено форми і розміри калібрувальних марок для можливості проведення калібрування по всій робочій відстані НЛС.

Основна частина. Наземні лазерні сканери, як гібридного, так і панорамного типу, сканують по регулярній сітці з інтервалом, що називається

кроком сканування. Зазвичай розміри сітки становлять одиниці або навіть частки міліметра на близьких відстанях. Очевидно, що в міру збільшення відстані комірки сітки ставатимуть більшими. Навіть якщо знехтувати величиною розсіювання лазерного променя та відповідним збільшенням лазерної плями, для більшої віддаленості від сканера потрібна марка більших розмірів.

Метою статті є дослідження форми і розміру марок різних типів і можливість їх однозначного визначення на різних відстанях від сканера.

Калібрувальні марки, відомі також як тестові об'єкти калібрування, бувають двох типів – точкові і площинні. Крім плоскої точкової марки, в якій визначають координати особливим чином виділеної точки, існує сферична марка, в якій визначають координати її центра.

Наводимо зображення плоских точкових і сферичної марок (рис. 1).

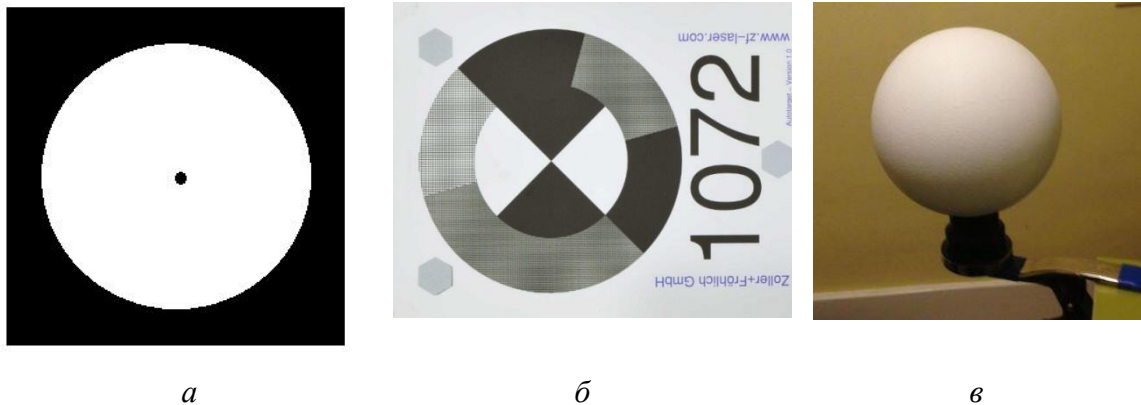


Рис.1. Калібрувальні марки:
а і б – точкові плоскі, в – сферична

Координати центра точкових марок, згідно з дослідженнями [8; 14] визначають в полярних координатах:

$$\rho_{ij} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho;$$

$$\varphi_{ij} = \arctan\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) + \Delta\varphi;$$

$$\alpha_{ij} = \arctan\left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}\right) + \Delta\alpha,$$

де ρ_{ij} , φ_{ij} , α_{ij} – відстань, горизонтальний кут і вертикальний кут відповідно точки i в системі координат сканера j ; x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} – прямокутні координати точки i в системі координат сканера j ; $\Delta\rho$, $\Delta\varphi$, $\Delta\alpha$ — додаткові систематичні поправки у, відповідно відстань, горизонтальний і вертикальний кут.

У разі використання площинних калібрувальних марок всі виміряні точки мають відповідати умовному рівнянню належності точки площині. Використання таких марок має ті переваги, що для цього не потрібні спеціальні плоскі або сферичні об'єкти і можна використовувати наявні на полігоні площини.

Використовуючи комбіноване перетворення Гаусса–Гельмерта, параметри площини, зовнішнього орієнтування та калібрування підставляють у рівняння

найменших квадратів:

$$n_k^T (M_j^T p_{ij} + P_{cj}) d_k = 0,$$

де n_k – вектор нормалі до площини k ; M_j – матриця повороту, що визначає обертання сканера j як функцію від кутів Ейлера; p_{ij} — результуючий вектор x_{ij} y_{ij} z_{ij} ; P_{cj} визначає тривимірне положення сканера j ; d_k – нормальна відстань від початку координат до площини k .

Дані досліджень [16] плоских площинних марок наочно підтверджують, що точність визначення координат за допомогою НЛС залежить не тільки від відстані до точки, а й від кута нахилу марки. Це є одним з недоліків використання точкових марок, особливо зважаючи на той факт, що кожен марку потрібно сканувати з різних станцій.

Одним із суттєвих недоліків використання площин як марок для калібрування є можлива відсутність геометрично правильних площин. Наприклад, поверхні в приміщенні (стіни, підлога, стеля) досить часто мають «вкраплення» у вигляді вентиляційних отворів, приладів освітлення тощо. Неякісно виконані будівельні і монтажні роботи також можуть призвести до того, що поверхня буде нерівною, що унеможливить проведення калібрування по ній. Поверхні поза приміщенням, які використовують для калібрування, перебувають під впливом зовнішніх умов та зазнають температурних та інших деформацій. В такому разі можна розглянути альтернативні форми поверхонь, наприклад, циліндричні.

Крім того, що вони досить часто трапляються — труби, пілони (в приміщенні), стовпи, опори, знаки (просто неба), їх переваги в тому, що їх зазвичай виготовляють фабричним способом і витримують геометричну точність циліндричної поверхні досить точно. Єдине обмеження у використанні таких об'єктів — їх невеликий діаметр (до 150 мм).

Принцип калібрування по циліндричних марках такий самий, як і по площинних, відрізняється тільки геометрична модель площини. Це дає можливість застосовувати метод найменших квадратів для одночасного оцінювання елементів зовнішнього орієнтування, параметрів моделі циліндра і додаткових параметрів системи.

У той час як для плоских площинних марок, незалежно від того, як вони орієнтовані у просторі, потрібна одна геометрична модель, для вертикальних і горизонтальних циліндричних марок потрібно три геометричних моделі [7]: одна вертикальна і дві горизонтальних. Залежно від орієнтації наявних циліндричних поверхонь на полігоні можна виконувати калібрування по одній, двох або трьох моделях одночасно.

Тему автоматичного і неавтоматичного розпізнавання точкових плоских марок висвітлено в окремому дослідженні [2]. Окрім того, є дуже велика кількість типів таких марок з різними способами визначення координат їх центра, тому в пропонованому дослідженні вони не розглядаються. Таким чином, в подальшому йтиметься про площинні (плоскі і циліндричні) та сферичні марки.

Більшість сучасних моделей НЛС, відповідно до технічних характеристик, мають крок сканування від 1 до 3 мм на 10 м. Для можливого оцінювання більшого діапазону моделей нами обрано крок сканування 2 мм. Зважаючи на те,

що максимальна відстань сканування для переважної більшості моделей не перевищує 350-400 м, відстані, для яких виконували розрахунки, не перевищують 350 м з інтервалом 50 м. Зведемо дані по відстанях між сусідніми точками сканування по горизонталі і вертикалі в табл. 1:

Таблиця 1

Відстань між двома сусідніми точками сканування залежно від відстані до сканера

Відстань до сканера, м	50	100	150	200	250	300	350
Відстань між точками, мм	10	20	30	40	50	60	70

З геометричного погляду, для однозначного визначення площини потрібно три неколінеарні точки. Зважаючи на велику вірогідність знаходження точок з одного проходу скануючої головки на одній осі, варто розглядати дві точки з одного проходу і одну-дві з сусіднього. Для сфери мінімальна кількість точок становить чотири неколінеарні і некопланарні точки. Зважаючи на вірогідність знаходження чотирьох точок з двох проходів на одній площині, варто розглядати мінімум п'ять точок — або дві з одного проходу і три з сусіднього, або по дві з двох проходів і одну з третього. Для циліндра можливим є рішення за 5, 6, 7 і 8 точками [6], проте воно має певні обмеження по колінеарності і копланарності точок [12; 19], тому, беручи до уваги потенційне розміщення циліндра паралельно одній з координатних осей системи координат сканера, варто розглядати набір з дев'яťох точок — по три з трьох сусідніх проходів.

Далі наведено схеми розміщення мінімального набору точок для однозначного визначення відповідних поверхонь. Суцільними лініями позначено проходи скануючої головки, колами — точки сканування, заповненими колами — точки сканування, потрібні для однозначного визначення поверхонь.

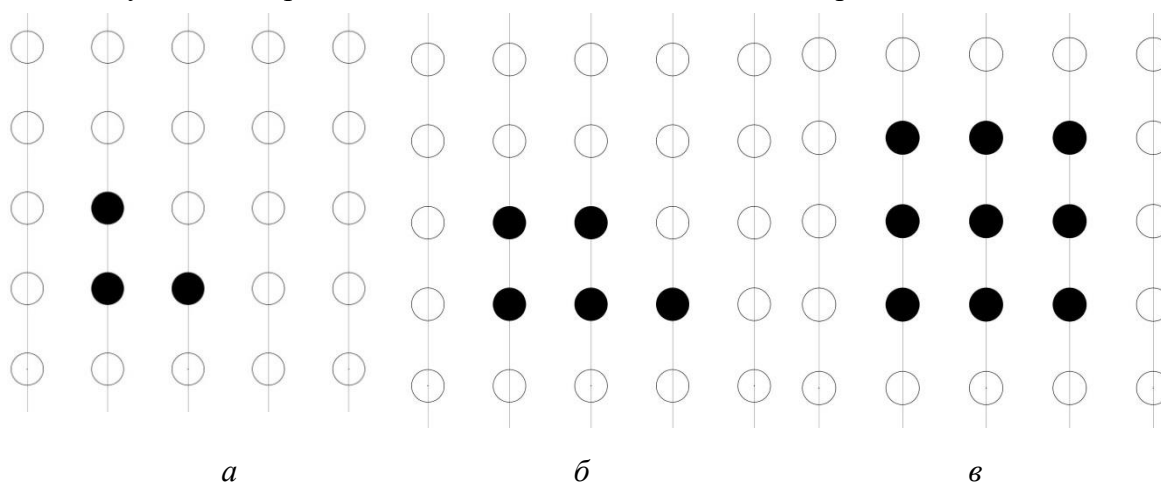


Рис.2. Мінімальний набір точок сканування для однозначного визначення поверхонь: *a* – площини; *б* – сфери; *в* – циліндра

Позначимо відстань між сусідніми точками як d . Таким чином, максимальна відстань між точками сканування для площини, сфери і циліндра становить відповідно d , $3d$ і $3d$. У розрахунках розмірів контрольних марок також потрібно зважати також на те, що така конфігурація точок справедлива для ідеального випадку попадання лазерного променя на відповідну площину. Для

забезпечення однозначного визначення поверхонь треба збільшити максимальну відстань в кожному випадку на величину d . Таким чином, максимальні відстані становитимуть відповідно $2d$, $4d$ і $4d$.

Величини d для різних відстаней від сканера до об'єкта наведено в табл. 1. Узагальнимо дані щодо мінімальних наборів точок в табл. 2.

Таблиця 2

Мінімальний розмір контрольних марок різних типів залежно від відстані до сканера

Відстань до сканера, м	50	100	150	200	250	300	350
Відстань між точками, мм (d)	10	20	30	40	50	60	70
Мінімальний розмір контрольної марки, мм							
Плоска ($2d$)	20	40	60	80	100	120	140
Сферична ($4d$)	40	80	120	160	200	240	280
Циліндрична ($4d$)	40	80	120	160	200	240	280

З наведеної таблиці видно, що для калібрування НЛС на всіх діапазонах відстаней за допомогою площинних марок достатньо плоских поверхонь з стороною, не меншою за 70 мм. На практиці поверхні такого і більшого розмірів трапляються досить часто. З приводу сферичних марок варто зауважити, що їх стандартний діаметр зазвичай становить 200 мм, в деяких випадках — 400 мм. Отже, в разі використання марок такого типу збільшеного діаметра можливим є калібрування НЛС на всіх діапазонах відстаней. З таблиці видно також, що стандартні циліндричні об'єкти, наявні в приміщеннях і поза їх межами, доцільно використовувати на невеликих відстанях.

Як уже зазначено, використання наявних плоских поверхонь має недолік, пов'язаний з їх геометричною точністю. Проте за умови наявності геометрично точних поверхонь навіть невеликого розміру, їх доцільно використовувати для калібрування НЛС на всіх діапазонах відстаней. Те саме стосується сферичних марок збільшеного розміру. Перевагою використання таких марок є те, що в процесі калібрування визначаються координати центра марки, що, за наявності вимірювань з різних станцій дає можливість проведення не тільки кутомірною, але й віддалемірною блоку сканера [4]. Використання стандартних циліндричних об'єктів не має такого недоліку, як у плоских, але можливе на менших відносно інших типів марок, відстанях.

Висновки. Виконано дослідження впливу відстані від сканера до калібрувальної марки на вибір її оптимальної форми і розміру. Визначено, що під час калібрування НЛС на відстані, більшій за 200 м, використання циліндричних марок є недоцільним через можливу відсутності мінімального набору точок для визначення циліндричної поверхні. Доведено також, що для великих відстаней доцільно використовувати плоскі площинні або стандарті сферичні марки збільшеного розміру. Очевидно, що під час калібрування НЛС з меншим кроком сканування, ніж взято у дослідженні, відстані для мінімального набору точок будуть збільшуватися пропорційно.

Через велику кількість різних типів плоских точкових марок потребують подальших досліджень способи визначення координат їх центрів у прив'язці до

максимальної відстані, на якій виконують калібрування.

Також потребує подальшого вивчення вплив систематичних похибок лазерного сканера на визначення координат центра сферичної марки або площини плоских і циліндричних площинних марок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Наземное лазерное сканирование* : монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. — Новосибирск : Сибирская гос. геодезическая академия, 2009. - 261 с.
2. *Сосса Б.Р.* Порівняльне оцінювання точності координат точкових марок, отриманих способом наземного лазерного сканування / Б.Р. Сосса // Вісник Чернігівського держ. технолог. ун-ту. — 2015.— Вип. 2 (78).— С. 165-171.
3. *Шульц Р.В.* Аналіз методів та моделей калібрування наземних лазерних сканерів / Р. В. Шульц // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. — 2011. — вип.ІІ.— С. 128-133.
4. *Шульц Р.В.* Теорія і практика використання наземного лазерного сканування в задачах інженерної геодезії : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук : 05.24.01 «Геодезія, фотограмметрія та картографія» / Р.В. Шульц. - Київ : КНУБА, 2012 р. — 36 с.
5. *Bae, K.* On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners / K. Bae, D. Lichti // The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W52) (12-14 Sep. 2007). — Espoo, Finland : 2007. — P. 14-19.
6. *Beder, C.* Direct solution for computing cylinders from minimal set of 3D points / C. Beder, W. Foerstner. // 9th European Conference of Computer Vision: Computer Vision – ECCV 2006 (7-13 May 2006). — Graz, Austria: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. — P. 135-146.
7. *Chan, T.* Cylinder-based self-calibration of a panoramic terrestrial laser scanner / T. Chan, D. Lichti. // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5, 2012, XXII ISPRS Congress, (25 August – 01 September 2012). - Melbourne, Australia.: Melbourne, 2012. — P. 169-174.
8. *Chow, J.* Point-based versus plane-based self-calibration of static terrestrial laser scanners / J. Chow, D.D. Lichti, C. Glennie // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W12, 2011, ISPRS Calgary 2011 Workshop (29-31 August 2011). - Calgary, Canada : Calgary, 2011. — P. 121-126.
9. *Cuartero A.* Error Analysis of Terrestrial Laser Scanning Data by Means of Spherical Statistics and 3D Graphs [Електронний ресурс] / A. Cuartero, J. Armesto, P. Rodriguez, P. Arias // SENSORS. — 2010. — № 10. — P. 10128-10145. — Режим доступу: <http://www.mdpi.com/1424-8220/10/11/10128>
10. *Foerstner, W.* «Mathematical concepts in photogrammetry» / W. Förstner, B. Wrobel // In: Manual of Photogrammetry, 5th ed. J.C. McGlone / Bethesda, MD, USA: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006. — 1151 p.
11. *Gruen, A.* Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision / A.

Gruen, T. S. Huang. — New York, Springer Science & Business Media, 2001. — P. 163-164.

12. *Lichtblau D.* Cylinder through five points: Computational algebra and geometry. / D. Lichtblau // Journal of Matematics Research. - 2012. - Vol. 4, No. 6. - P. 65-82. doi:10.5539/jmr.v4n6p65.

13. *Lichti, D.* Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment / D.D. Lichti, M.G. Licht // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 5) (Sep 25-27 2006). — Dresden, Germany: Dresren, 2006. — P. 155-160.

14. *Lichti, D.* Modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner / D. Lichti // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2007. - 61 (5). - P. 307-324.

15. *Lichti, D.* Self-Calibration and Analysis of the Surphaser 25HS 3D Scanner / D. Lichti, S. Brustle, J. Franke // Proceedings of the Strategic Integration of Surveying Services, FIG Working Week, (13–17 May 2007). - Hong Kong, China: Hong Kong, 2007. — P. 31-44.

16. *Miri, M.* Evaluating parameters affecting the georeferencing accuracy of terrestrial laser scanners / M. Miri, M. Varshosaz // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W16, 2011 ISPRS Trento 2011 Workshop, (2-4 March 2011). - Trento, Italy: Trento, 2011 — P. 387-390.

17. *Reshetyuk, Y.* Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning : Doctoral thesis in Infrastructure : Geodesy / Y. Reshetyuk. - Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy, 2009. — 173 c.

18. *Schultz, T.* Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy: Dissertation for the degree of Doctor of Sciences / T. Schultz. — Zurich : ETH Zurich, 2007. — 172 p.

19. *Zsombor-Murray, P.* A cilinder of revolution on 5 points / P. Zsombor-Murray, S. El Fashny // Journal for Geometry and Graphics. - 2006. – Vol. 10. – No.2. — P. 207-213.

REFERENCES

1. Seredovich, V.A., Komissarov, A.V., Komissarov, D.V., & Shyroкова, T.A. (2009). *Nazemnoie lazernoie skanirovaniye: monografiya [Terrestrial laser scanning]*. Novosibirsk, SGGA [in Russian].

2. Sossa, B.R. (2015). Porivnialne ociniuvannia tochnosti koordynat tochkovykh marok, otrymanykh sposobom nazemnoho lazernoho skanuvannia [Comparative estimation of the accuracy of point-based targets coordinates, obtained with terrestrial laser scanning]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu – The Chernihiv State Technologies University Herald*, 2 (78), 165-171 [in Ukrainian]

3. Schultz, R.V. (2011). Analiz metodiv ta modelei kalibruvannia nazemnykh lazernykh skaneriv [Analysis of terrestrial laser scanners calibration methods and models]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnyctva [Modern achievements of geodetic study and production]*.— Vol.II. — 128-133 [in Ukrainian].

4. Schultz, R.V. (2012). Teoriia i praktyka vykorystannia nazemnoho lazernoho skanuvannia v zadachakh inzhenernoi heodezii [Theory and practice of using terrestrial laser scanning in tasks of engineering geodesy]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kyiv: KNUCA [in Ukrainian].
5. Bae, K. & Lichti D. (2007). On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W52)*. (pp. 14-19) — Espoo, Finland.
6. Beder, C. & Foerstner W. (2006). Direct solution for computing cylinders from minimal set of 3D points. *9th European Conference of Computer Vision: Computer Vision – ECCV 2006* (pp. 135-146). Graz, Austria: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
7. Chan, T. & Lichti D. (2012). Cylinder-based self-calibration of a panoramic terrestrial laser scanner. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5, 2012, XXII ISPRS Congress* (pp. 169-174). Melbourne, Australia: Melbourne.
8. Chow, J., Lichti D.D. & Glennie C. (2011). Point-based versus plane-based self-calibration of static terrestrial laser scanners. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W12, 2011, ISPRS Calgary 2011 Workshop*. (pp. 121-126). Calgary, Canada : Calgary.
9. Cuartero, A., Armesto, J., Rodriguez, P., & Arias, P. (2010). Error Analysis of Terrestrial Laser Scanning Data by Means of Spherical Statistics and 3D Graphs. *SENSORS*. № 10. 10128-10145. Retrieved from <http://www.mdpi.com/1424-8220/10/11/10128>
10. Foerstner, W. & Wrobel B. (2006). "Mathematical concepts in photogrammetry." *Manual of Photogrammetry, 5th ed.*, (1151 p.). Bethesda, MD, USA: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
11. Gruen, A. & Huang T.S. (2001). *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*. (pp. 163-164). New York: Springer Science & Business Media.
12. Lichtblau D. (2012). Cylinder through five points: Computational algebra and geometry. *Journal of Mathematics Research*, Vol. 4, No. 6, 65-82. doi:10.5539/jmr.v4n6p65.
13. Lichti, D. & Licht, M.D. (2006). Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 5)* (pp. 155-160). Dresden, Germany : Dresden.
14. Lichti, D. (2007). Modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61 (5), 307-324.
15. Lichti, D., Brustle, S. & Franke, J. (2007). Self-Calibration and Analysis of the Surphaser 25HS 3D Scanner. *Proceedings of the Strategic Integration of Surveying Services, FIG Working Week*, (pp. 31-44). Hong Kong, China : Hong Kong.
16. Miri, M. & Varshosaz, M. (2011). Evaluating parameters affecting the georeferencing accuracy of terrestrial laser scanners. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W16, 2011 ISPRS Trento 2011 Workshop*, (pp. 387-390). Trento, Italy: Trento.

17. Reshetyuk, Y. (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. *Doctoral thesis in Infrastructure*. Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy.
18. Schultz, T. (2007). Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. *Doctor's thesis*. Zurich: ETH Zurich.
19. Zsombor-Murray, P. & El Fashny, S. (2006). A cylinder of revolution on 5 points. *Journal for Geometry and Graphics*, Vol. 10, 2006, No.2, 207-213.

Б.Р. Сосса

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ТИПА И РАЗМЕРА
ПЛОСКОСТНЫХ МАРОК, КОТОРЫЕ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ПРИ
КАЛИБРОВКЕ НАЗЕМНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРОВ**

Современные исследования методов калибровки НЛС проводятся в помещениях и ограничены по расстоянию. В статье рассмотрено применение плоских и цилиндрических плоскостных, а также сферических марок или тестовых калибровочных объектов при калибровке наземных лазерных сканеров на всех диапазонах измеряемых расстояний. Исследованы минимально допустимые размеры марок для однозначного определения поверхностей на расстояниях до 350 м. Доказано, что для проведения калибровки на больших расстояниях нецелесообразно использовать цилиндрические марки и сферические марки стандартных размеров. Зато целесообразно использовать плоские плоскостные марки и сферические марки увеличенного размера.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, калибровка сканеров, сферические марки, цилиндрические марки, плоские плоскостные марки, тестовые объекты калибровки.

B. Sossa

**DETERMINATION OF OPTIMAL TYPE AND SIZE OF PLANE-BASED
TARGETS USING IN TERRESTRIAL LASER SCANNERS CALIBRATION**

Terrestrial laser scanners are widely using in modern surveying, including engineering geodesy tasks. One of the way to improve the accuracy of TLS is calibration. There are number of calibration investigations using different types of calibration targets. But most of them are made indoor, that means they are using quite short distances, despite there are math models of long-range calibration polygons.

It was determined the most modern TLS's average maximal range (350 m) and resolution (2 mm at 10 m) as a subject of study. Flat and cylindrical plane-based as well as spherical targets are reviewed in this issue corresponding to calibration ability through the all range of modern TLS's measured distances. The minimum sets of points for appropriate surface unambiguous determining are investigated and minimal permissible targets size are determined. The minimum sets of points are compared with standard shapes using for TLS calibration.

It was proven that it's advisable to use flat plane-based and larger spherical targets for long-range (up to 350 m) calibration while using cylindrical and standard

spherical targets is possible for shorter distances (up to 150-200 m). Obviously, that using TLS with better resolution, the distance for minimal points set will increase pro rata.

Key words: *terrestrial laser scanning, scanners calibration, spherical targets, cylindrical targets, plane-based targets, test calibration objects.*

Надійшла до редакції

05.04.2018

УДК 517

О.М. Гончерюк, аспірант кафедри інженерної геодезії
Київський національний університет будівництва і архітектури

МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ПОПЕРЕДНЬОГО РОЗРАХУНКУ ТОЧНОСТІ ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, СТВОРЕНИХ ЗА ДАНИМИ LOW-COST ФОТОГРАММЕТРІЇ

У роботі наведено методику виконання попереднього розрахунку точності фотограмметричних вимірювань з використанням цифрових камер, якими обладнані сучасні смартфони. Розглянуто основні аналітичні залежності цифрової фотограмметрії для прямої фотограмметричної засічки. Виконано аналіз основних джерел похибок цифрових неметричних камер. Розглянуто питання розрахунку точності вимірювань на цифровому знімку з врахуванням похибок дискретизації цифрового зображення, наведення, роздільної здатності та розфокусування. Для розрахунків були використані типові параметри цифрових камер сучасних смартфонів. Використовуючи отримані сумарні похибки, виконано розрахунок точності створення фотограмметричних моделей за формулами прямої фотограмметричної засічки. Наведено вирази для розрахунку впливу похибок кутових елементів знімків та похибок координат центрів фотографування. Виконано попередній розрахунок точності для екстремальних значень кутів розвороту цифрових знімків. Результати розрахунку дозволяють зробити висновки, що за найбільш несприятливих умов камери сучасних смартфонів дають змогу створювати тривимірні моделі з просторовою точністю, не гіршою за 5 см, для відстаней до 20 метрів для конвергентного знімання. Встановлено, що підвищити точність визначення координат можна шляхом підбору вдалої геометрії фотографування та використання кодових марок для орієнтування знімків.

Ключові слова: цифрова фотограмметрія, неметрична камера, low-cost фотограмметрія, попередній розрахунок точності, пряма фотограмметрична засічка.

Вступ. Завданням цифрової фотограмметрії є вирішення завдань геодезії засобами фотограмметрії на базі використання цифрових технологій. На відміну від класичної інженерної (прикладної) фотограмметрії в інженерній цифровій